

电力系统安全稳定综合防御体系框架

汤涌

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Framework of Comprehensive Defense Architecture for Power System Security and Stability

TANG Yong

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: A framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability is presented. From the general safety concept, the comprehensive defense architecture should include the power system security assurance system, i.e. active safety system, and power system stability control system, i.e. passive safety system. Power system security assurance system (active safety) refers to the measures to improve power system security and controllability. Power system stability control system (passive safety) refers to the measures to maintain power system security and stability during disturbances. The power system security assurance system (active safety) can be set to three-defense lines. The first defense line is a strong power grid structure, to lay a solid foundation for the power system security; the second defense line is the optimized automatic control system, to enhance the safe operation of power system; the third defense line is a safe operation planning to ensure that the power system operates at a safe level. Power system stability control system (passive safety) is the traditional three-defense lines for power system security and stability. The first defense line is rapid removal of faulty components, to prevent the failure to expand; the second defense line is the control measures to maintain power system stability; the third defense line is the measures to prevent widespread blackouts when power system loses stability.

KEY WORDS: power system; security defense architecture; active safety; passive safety; three-defense lines

摘要: 提出了电力系统安全稳定综合防御体系的框架。从一般安全理念出发, 电力系统安全稳定综合防御体系可由电力系统安全保障体系(即主动安全体系)和电力系统稳定控制系统(被动安全体系)构成。电力系统安全保障体系(主动安全)是指提高电力系统安全性和可控性的措施; 电力系统稳定控制系统(被动安全)是指保证电力系统受到扰动后的安全性和稳定性的措施。电力系统安全保障体系(主动安全)可

分为三道防线: 第一道防线是坚强的电网结构, 为电力系统安全奠定坚实基础; 第二道防线是最优的自动控制系统, 提升电力系统的安全运行水平; 第三道防线是安全的运行方式, 保证电力系统运行在安全水平。电力系统稳定控制体系(被动安全)就是传统的电力系统安全稳定三道防线, 第一道防线是快速切除故障元件, 防止故障扩大; 第二道防线是采取稳定控制措施, 保持系统稳定运行; 第三道防线是系统失去稳定时, 防止发生大面积停电。

关键词: 电力系统; 安全防御; 主动安全; 被动安全; 三道防线

0 引言

电力系统安全稳定运行问题是一个关系到社会稳定和经济发展的世界共性问题, 历来受到各国政府及电力企业的高度关注。从20世纪60年代起, 大面积停电事故就时有发生, 每次大面积停电事故都会造成巨大的经济损失^[1-6]。各国电力企业都高度关注电力系统安全问题, 投入了大量的人力和财力开展保障电力系统安全问题的研究, 也取得了令人瞩目的成效, 使电力系统发生大面积停电的次数越来越少。但是, 随着电力系统规模的不断扩大, 电力系统结构的日趋复杂, 电力系统安全问题仍然没有得到彻底解决, 2003年北美东部电网“8·14”大停电就是一个举世瞩目的例证^[7-8]。

为此, 电力系统领域的专家和学者仍然在不遗余力地对电力系统安全防御问题持续开展深入的研究, 力图在理论上有所突破, 在技术上有所创新^[9-22]。

为满足电力负荷持续快速增长的需求, 我国正在建设世界上电压等级最高、规模最大的交直流混合电力系统。为此, 构建安全可靠的电力系统综合防御体系, 研究能够有效地降低大面积停电风险的技术手段, 确保我国电力系统的安全稳定运行, 是

基金项目: 国家电网公司重大科技项目(SGCC-MPLG001-2012)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC
(SGCC-MPLG001-2012).

我国电力系统发展面临的基础性、关键性和迫切性问题。

本文从电力系统安全保障体系(主动安全)和电力系统安全稳定控制体系(被动安全)2个方面出发,提出电力系统综合安全防御体系框架,为保证电力系统安全稳定运行提供理论支持。

1 电力系统安全稳定综合防御体系

对电力系统规划和运行而言,安全是永恒的主题。电力系统规划设计和调度运行要把电力系统安全放在首位,务必保证电力系统的安全稳定运行。为预防电力系统大停电事故的发生,必须构建坚强的电力系统综合安全防御体系。电力系统安全防御是一个综合性问题,涉及电网结构、自动控制、运行方式计划、安全稳定控制、防止大面积停电等各个方面,是一个极其复杂的系统工程。

从总体上说,电力系统安全稳定综合防御体系可以分为电力系统受扰动前的安全保障体系和电力系统受扰动后的安全稳定控制体系。从一般的安全理念出发(如汽车安全、网络安全等),就是要从主动安全和被动安全2个方面构建电力系统安全稳定综合防御体系。

对于电力系统而言,主动安全就是电力系统受扰动前的安全保障体系,是一种主动的、积极的防止电力系统发生安全稳定事故的安全保障体系,主要是指提高电力系统安全性和可控性的措施;被动安全就是电力系统受扰动后尽可能地保持电力系统稳定运行、不发生大面积停电事故的安全稳定控制体系,主要是指保证电力系统受到扰动后的安全性和稳定性的措施,即传统的电力系统安全稳定三道防线。

电力系统安全保障体系(主动安全)可分为三道

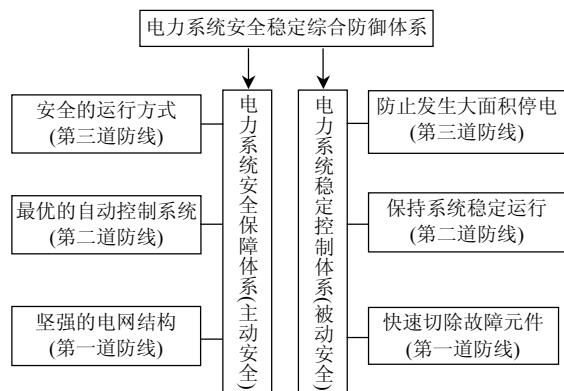


图1 电力系统安全稳定综合防御体系框架

Fig. 1 Framework of comprehensive defense system for power system security and stability

防线,即电力系统安全保障三道防线(主动安全三道防线):第一道防线,坚强的电网结构,奠定电力系统安全的坚实基础;第二道防线,最优的自动控制系统,提升电力系统的安全运行水平;第三道防线,安全的运行方式,保证电力系统运行在安全水平。

电力系统稳定控制体系(被动安全)主要包括传统的安全稳定三道防线(被动安全三道防线):

第一道防线,快速切除故障元件,防止故障扩大;第二道防线,采取稳定控制措施,防止系统失去稳定;第三道防线,系统失去稳定后,防止发生大面积停电。

电力系统的安全稳定综合防御体系应从电力系统安全保障体系(主动安全)和电力系统安全稳定控制体系(被动安全)2个方面加以保证,在完善传统的电力系统稳定三道防线的同时,加强电力系统的主动安全水平,构建电力系统安全保障体系(主动安全)三道防线。

2 电力系统安全保障体系三道防线(主动安全三道防线)

2.1 坚强的电网结构,奠定电力系统安全的坚实基础

坚强的电网结构是电力系统安全的物质基础,是电力系统安全保障体系(主动安全)的第一道防线。

实践证明,电网规划必须考虑电力系统安全稳定运行的要求。如果电网规划缺乏安全约束条件,特别是电网结构不合理,将给电力系统的安全稳定运行带来严重后患。

坚强的电网结构是指为了保证各种正常和检修运行方式下的送电和用电需要,满足《电力系统安全稳定导则》规定的承受故障扰动的能力和具有灵活的适应性,以及主干输电网应具备的结构、容量和灵活性品质。坚强的电网结构是保证电力系统安全稳定的基础。在电网规划设计中,应从全局着眼,综合分析系统特性,充分论证,统筹考虑,合理布局,加强主干网络。

特别是随着我国特高压交直流混联电力系统的逐步形成,电网形态日趋复杂,给电网规划设计提出了更高的要求。为提高电力系统构建的科学性与合理性,需要建立电力系统构建理论体系,研究交直流电网合理建设规模,完善多直流馈入受端电网安全评估方法;从理论上解决交直流协调发展、受端电网合理受电规模问题,正确评价电网经济效益和综合效益,从规划角度提高电网的输电能力以

及大规模新能源的接纳能力,提升电力系统规划理论和支持技术水平,为构建坚强特高压交直流混合电力系统提供理论和技术支撑。

2.2 最优的自动控制系统,提升电力系统的安全运行水平

电力系统是一个复杂的非线性动态大系统,其自动控制系统是电网安全保障体系(主动安全)的第二道防线。

虽然电网结构越坚强越好,但是在实际电网构建中,还要受到技术、经济、环境等各种因素的制约,不可能仅仅依靠坚强的电网结构来保证电网的绝对安全。

在电网结构确定的情况下,进一步提高电力系统主动安全的防线就是电力系统的自动控制系统。

电力系统中最重要的动态元件是发电机组,其控制技术已得到深入研究,发电机调速控制、励磁控制以及附加控制系统(如电力系统稳定器)已在电力系统中得到了广泛应用;发电机组非线性最优控制技术和基于广域测量系统(WAMS)的电力系统广域阻尼控制技术有了重要进展。

但是,在考虑多种新型控制设备和多种控制方法并存的优化策略研究方面还有相当大的提升空间。发电机及其控制系统对电力系统运行控制的优化协调作用尚未充分发挥。现有的直流控制策略没有充分考虑与接入交流电网的相互影响;考虑交直流协调和多直流协调的综合控制方案尚未成型。

随着我国特高压交直流混联电力系统的发展,电力系统的稳定问题日益突出、交流通道承受潮流转移的压力加大、输电能力受限;灵活交流输电(FACTS)设备的大量应用增加了电力系统控制的复杂性;大容量交直流远距离混联送电,运行方式多变,局部分散控制难以适应未来电网复杂多变的形态。电力系统面临的这些新问题和挑战,对其自动控制水平提出了更高的要求。

另外,为解决电力系统建设的过渡期所面临的运行控制问题,需要充分利用先进控制理论和广域信息,优化电力系统自动控制系统,提升电力系统安全运行水平;加强交直流广域协调控制技术的应用研究,全面提升电网的综合控制能力和安全稳定运行水平。

2.3 安全的运行方式,保证电力系统运行在安全水平

在电网结构和自动控制系统确定的条件下,保

证电力系统运行在安全水平的运行方式的计划与调度,是电力系统安全保障体系(主动安全)的第三道防线,也是主动安全的最后一道防线。

电力系统运行方式的总体计划,一般由各级调度部门的年度运行方式计算分析确定。但是,在日常调度运行中,还要依靠电力系统调度自动化系统、在线安全预警和辅助决策系统,来掌握电力系统方式运行变化,并根据《电力系统安全稳定导则》规定的安全稳定三级标准的要求,及时进行预防性控制,保证电力系统运行在安全的水平。

因此,需要进一步提升电力系统调度运行在线安全分析技术和运行支撑技术,完善电网运行在线评估和辅助决策支持技术,为运行方式的优化提供决策支持,保证电力系统运行在安全稳定范围内。

随着我国电力系统的发展,受端系统大容量多直流集中馈入,受电比例越来越高,电力系统稳定问题越发突出,需要研究适应电力系统发展要求的电压稳定评估和动态无功备用容量优化新技术;特高压交直流混联系统运行方式复杂多变,风电、光伏等新能源大规模接入和FACTS技术的广泛应用,增加了电力系统运行方式的多变性和复杂性,需要研究在线安全评估、预警及辅助决策技术;由于特高压交、直流输电通道具有远距离、大容量的特点,自然灾害等外部因素对电力系统安全稳定运行的影响显得更加突出,需要研究考虑自然灾害等不确定性因素的电力系统安全运行预警及辅助决策技术。

3 电力系统稳定控制三道防线(被动安全三道防线)

3.1 快速切除故障元件,防止故障扩大

电力系统安全稳定控制系统的体系(被动安全)的第一道防线是快速切除故障元件,防止故障扩大。主要由性能良好的继电保护装置构成,要求能够快速、精确、可靠地切除故障元件,将故障的影响限制在最小范围内,有效防止故障扩大。

快速、精确、可靠切除故障元件,必须确保继电保护系统和断路器可靠地正确动作,所以要加强二次设备管理,排除隐性故障,确保各种装置在各种可能情况下正确动作,不发生误动、拒动,有效防止故障的扩大。

随着我国电力系统的发展,需要进一步深入研究特高压交直流混联电力系统的故障电气特性以

及对继电保护的影响和对策；研究含大功率电力电子元件的灵活交流输电系统(FACTS)对继电保护的影响；研究大规模间歇式可再生能源发电接入后电力系统故障特征及保护配置和整定技术；研究适应特大型特高压交直流电力系统要求的继电保护标准体系；研究电力系统继电保护与控制系统的隐性故障特征挖掘、辨识、预警及预防技术。

3.2 采取稳定控制措施，保持系统稳定运行

电力系统安全稳定控制系统体系(被动安全)的第二道防线是采取必要的切机、切负荷、解列、直流调制等安全稳定控制措施，防止系统失去稳定。

在故障扰动发生后，第一道防线正确动作切除故障元件，但由于故障比较严重，可能导致电力系统失去稳定时；或第一道防线不正确动作导致故障扩大，而可能导致电力系统失去稳定时，为保持电力系统受扰动后的稳定运行而采取的措施，就是电力系统安全稳定控制系统(被动安全三道防线)的第二道防线，主要由电力系统安全稳定控制装置构成，要求能够准确、可靠的动作，保证电力系统能够维持稳定运行。

随着电力系统安全稳定控制技术的发展，需要进一步深入研究基于广域同步实测动态响应轨迹的电力系统特性分析及控制策略，研究基于广域量测信息的主动自适应解列方法，间歇式可再生能源大规模并网安全稳定控制策略，交直流混联电力系统的协调控制技术，受端电力系统电压稳定紧急控制策略研究。特别是基于响应的电力系统安全稳定控制技术研究。

3.3 系统失去稳定时，防止发生大面积停电

电力系统安全稳定控制系统体系(被动安全)的第三道防线是在系统失去稳定后，为防止发生大面积停电，而采取的解列、切负荷、切机等措施、以及调度运行人员采取的紧急措施。

在电力系统安全稳定控制系统(被动安全)第二道防线正确动作但故障的严重程度超出的第二道防线的设防范围，或第二道防线不正确动作导致系统稳定破坏时，为使稳定破坏的影响限制在最小范围、不发生大面积停电事故，而采取的措施，就是电力系统安全稳定控制系统(被动安全)的第三道防线，也是最后一道防线。主要由失步解列、高频切机、低频切负荷、低压切负荷等自动装置和调度运行人员采取的紧急措施构成，要求能够有效防止大面积停电。

在自动控制方面，需要深化研究电网连锁反应故障和大面积停电发生的机理和特性；研究特大规模电网第三道防线配置及控制策略、研究大规模可再生能源并网与低频低压减载、解列、高周切机等第三道防线措施交互影响及协调控制策略。

在调度紧急控制方面，由于在系统稳定破坏的紧急控制中，调度员的紧急事故处理，已是防止大面积停电事故的最后一个环节。因此，在紧急事故处理时，调度员要掌握电力系统运行状态，判断事故发生性质及其影响范围，熟 电力系统事故应急预案，采取一切必要手段，控制事故范围，有效防止事故进一步扩大，尽可能保证主网安全和重点地区、重要城市的电力供应。在事故处理中要 于弃局部，保全整体。文献[13]指出，多年的运行经验说明，在处理紧急事故时 于 弃并不是权宜之计，而恰恰是防止发生大停电的有效手段。2006 年华中电网“7·1”事故的紧急处理过程也充分证明了这一点。

4 结语

本文从电力系统安全保障体系(主动安全)和电力系统稳定控制体系(被动安全)2 个方面，提出了电力系统安全稳定综合防御体系的框架。

电力系统安全保障体系(主动安全)由坚强的电网结构、最优的自动控制系统和安全的运行方式三道防线构成；电力系统稳定控制体系(被动安全)由快速切除故障元件、保持系统稳定运行和防止发生大面积停电三道防线构成。

要充分利用信息、计算与控制领域的最新技术，通过构建坚强的电网结构，配置最优的自动控制系统，安排合理的安全运行方式，加强电力系统安全保障体系(主动安全)的三道防线；进一步完善电力系统稳定控制体系(被动安全)的三道防线，保障我国特大规模交直流混联电力系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心. 全国电网典型事故分析(1988—1998) [M]. 北京：中国电力出版社，2000：1-85.
- [2] 国家电力调度通信中心. 电网典型事故分析(1999—2007 年)[M]. 北京：中国电力出版社，2009：1-98.
- [3] 王梅义. 大电网事故分析与技术应用[M]. 北京：中国电力出版社，2008：20-102.
- [4] 韩水，舜，张近珠. 国外典型电网事故分析[M]. 北京：中国电力出版社，2005：1-147.
- [5] 林伟芳，汤涌，孙华东，等. 巴西“2·4”大停电事故及对电网安

- 全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 1-5.
 Lin Weifang, Tang Yong, Sun Huadong, et al. Blackout in Brazil power grid on february 4, 2011 and inspirations for stable operation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 1-5(in Chinese).
 [6] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.
 Lin Weifang, Sun Huadong, Tang Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on November 10, 2009 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5(in Chinese).
 [7] U. S. - Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. 2004. <http://eneergy.gov/>.
 [8] The NERC Steering Group. Technical analysis of the August 14, 2003, blackout: what happened, why, and what did we learn? [R]. 2004. <http://www.nerc.com/>.
 [9] 王梅义. 维护电网安全的基本策略[J]. 电网技术, 1997, 20(9): 36-40.
 Wang Meiyi. Basic strategies for the security of power systems [J]. Power System Technology, 1997, 20(9): 36-40(in Chinese).
 [10] 袁季修. 电力系统安全稳定控制的规划和应用[J]. 中国电力, 1999, 32(5): 29-32.
 Yuan Jixiu. Planning and application of power system security and stability control[J]. Electric Power, 1999, 32(5): 29-32(in Chinese).
 [11] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
 Han Zhenxiang, Cao Yijia. Power systems security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6(in Chinese).
 [12] 陈德树. 大电网安全保护技术初探[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 14-17.
 Chen Deshu. Preliminary research on security protection technology of large scale power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 14-17(in Chinese).
 [13] 杨以涵, 张东英, 马 , 等. 电力系统安全防御体系的基础研究 [J]. 电网技术, 2004, 28(9): 23-27.
 Yang Yihan, Zhang Dongying, Ma Qian, et al. Study on the architecture of security and defense system of large scale power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 23-27(in Chinese).
 [14] 孙光辉, 沈国荣. 加强电网三道防线 确保我国电力系统的安全 [C]//中国科协 2004 年学术年会电力分会场 中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集, 中国, 海南.
 [15] 禹胜. 时空协调的大停电防御框架(一): 从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-16.
 Xue Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part 1 from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16(in Chinese).
 [16] 赵建国, 禹胜. 南方电网综合防御框架的构思[J]. 南方电网技术, 2008, 2(1): 1-7.
 Zhao Jianguo, Xue Yusheng. Design of blackout defense framework for China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(1): 1-7(in Chinese).
 [17] 丁道齐. 深入研究复杂电网动态行为特征 构建中国特高压电网安全保障[J]. 中国电力, 2008, 41(8): 1-7
 Ding Daoqi. In-depth study the complex grid dynamic action characteristic to set up China UHV grid safety guarantee[J]. Electric Power, 2008, 41(8): 1-7(in Chinese).
 [18] Taylor C W, Erickson D C, Wilson R E. Reducing blackout risk by a wide-area control system (WACS): adding a new layer of defense[C]// 15th PSCC, Liege, 2005: 22-26.
 [19] Massoud A. Energy infrastructure defense systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 861-875.
 [20] Trudel G, Gingras J P, Pierre J R. Designing a reliable power system: hydro-québec's integrated approach[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 907-917.
 [21] Li H, Rosenwald G W, Jung J, et al. Strategic power infrastructure defense[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 918-933.
 [22] Task Force C2.02.24 . Defense plan against extreme contingencies[R]. Cigre technical brochure 316, 2007.

收稿日期: 2012-07-09。

作者简介:

汤涌(1959), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事电力系统仿真与建模、分析与控制领域的研究, E-mail: tangyong@epri.sgcc.com.cn。



汤涌

(责任编辑 王晔)